



TITLE:

# Bi系高温超伝導体固有ジョセフソン接合における接合間相互作用下の巨視的量子トンネル現象に関する研究( Abstract\_要旨 )

AUTHOR(S):

野村, 義樹

---

CITATION:

野村, 義樹. Bi系高温超伝導体固有ジョセフソン接合における接合間相互作用下の巨視的量子トンネル現象に関する研究. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-07-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20629>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により要約は2018-07-23に公開

京都大学	博 士 (工 学)	氏名	野村 義樹
論文題目	Bi 系高温超伝導体固有ジョセフソン接合における接合間相互作用下の巨視的量子トンネル現象に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、高温超伝導体に含まれる固有ジョセフソン接合を実デバイスに応用するための一般的な理解を目指し、固有ジョセフソン接合間に働く相互作用についての系統的な研究をまとめたもので、6章からなる。</p> <p>第1章は序論であり、研究背景と研究目的を述べている。まず、ジョセフソン接合の超伝導状態から電圧状態へのスイッチについて述べ、スイッチの揺らぎをもたらす熱活性型脱出と巨視的量子トンネル効果(MQT)について説明している。次に測定対象物質である3種類のビスマス(Bi)系高温超伝導体の結晶構造および既知の固有ジョセフソン特性の比較について論述し、さらに固有ジョセフソン接合系の研究で課題とされている接合間相互作用について述べている。最後に、本研究の位置づけおよび目的として、これら3種のBi系高温超伝導体の結晶構造の違いに注目して固有ジョセフソン接合間相互作用を明らかにすることと、その学術的普遍性について述べている。</p> <p>第2章では、実験に用いたメサ構造素子の作製方法と評価方法について述べている。物質パラメータを変えて接合間結合を変化させる手法が提案されており、複数のジョセフソン接合におけるスイッチを同時測定するために新しく作製したスイッチング確率分布測定回路を説明している。</p> <p>第3章では、作製した素子の抵抗率の温度依存性および電流電圧特性について述べ、電流電圧特性からジョセフソン接合の統合現象に関して考察を行っている。高温超伝導体Bi2201とBi2212の電流電圧特性を比較した結果、Bi2201では固有ジョセフソン接合間で強制振動に類似の効果が働くことを示し、その起源として、電荷結合と準粒子注入効果を挙げている。Bi2223とBi2212の電流電圧特性を比較した結果を基に、近接効果と呼ばれる超伝導体と常伝導体が接続した構造において生じる準粒子の拡散長が0.6以上1.25 nm以下であることを見出している。</p> <p>第4章では、高温超伝導体Bi2212素子のスイッチング確率分布特性を述べている。本研究では臨界電流密度の異なる4つの素子について測定を行った。一つの接合がゼロ電圧から有限電圧に遷移する第一スイッチのMQTと熱活性型脱出とが等しくなるクロスオーバー温度は、0.8から2.2 Kとなる。この値は理論的に見積もられる値よりも0.5から1.8 K高く、これは外来ノイズの影響を完全に排除できていないためであると考えられる。熱活性型脱出が支配的となる温度では、スイッチング確率分布の分布幅に相当する実効温度と測定温度が一致するという結果が得られた。この領域では分布の温度依存性は熱活性型脱出で説明できる。第二の接合が電圧状態に遷移する第二スイッチのクロスオーバー温度は6.7から8.0 Kとなる。10 K以上の温度領域では実効温度と測定温度が一致しており、この温度領域では分布の温度依存性は熱活性型</p>			

京都大学	博 士 (工 学)	氏名	野村 義樹
<p>脱出で説明できる。この点から磁気結合は第二スイッチの高いクロスオーバー温度に寄与しないということを示している。揺らぎなしの臨界電流密度が増加すると、クロスオーバー温度は低下するという負の相関が得られ、電荷結合によってこの関係性を説明できることを示している。これは固有ジョセフソン接合において電荷結合による相互作用を初めて明示的に見出した結果である。</p> <p>第 5 章では、Bi2201 素子と Bi2223 素子のスイッチング確率分布特性について述べている。また Bi2201 や Bi2223 の結果を Bi2212 と比較することで固有ジョセフソン接合の結合現象について新たな知見を得た。Bi2201 では第一スイッチは 0.65 K 以下で MQT が支配的となり、0.65 K 以上の温度では熱活性型脱出が支配的となる。一方で、第二スイッチは 1.7 K より低温で MQT が支配的となり、Bi2212 同様、第一スイッチよりも高い温度で MQT が支配的となる。このクロスオーバー温度が Bi2212 に比べて低い理由は、ジョセフソン接合における位相散逸が強いためと考え、位相散逸によって結合現象が抑制される可能性を示す。Bi2223 では第一スイッチは、2.0 から 2.3 K 以下で MQT が支配的となり、Bi2212 と同様の傾向が得られた。第二スイッチの MQT と熱活性型脱出とが等しくなる温度は 2.0 から 3.5 K であり、実効温度の測定温度依存性は第一スイッチとほぼ同じ傾向を示した。この傾向は Bi2212 と異なっている。Bi2223 と Bi2212 の違いは超伝導層の厚さのみであり、Bi2223 の超伝導層は CuO<sub>2</sub> 面が一枚多いため、Bi2212 に比べて 0.35 nm ほど厚くなる。そのわずかな違いで MQT と熱活性型脱出とが等しくなる温度が著しく変化することから、第二スイッチの高いクロスオーバー温度は電荷結合などの超伝導層厚さに強く依存する現象によって引き起こされていることを示している。</p> <p>第 6 章では、本論文の結論を述べている。電荷結合による相互作用を初めて明示的に示した点など、隣接する固有ジョセフソン接合間で相互作用があるような系における MQT に関して、短距離的な相互作用、特に電荷結合が重要である点についてまとめている。また Bi2212 と Bi2223 で相互作用の影響が大きく異なることから、今後の研究課題として、これまで主に研究されてきた Bi2212 だけでなく、相互作用の弱い Bi2223 に注目した研究が展開される点について言及している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、銅酸化物高温超伝導体においてみられる固有ジョセフソン接合間の相互作用を明らかにするために、3種のビスマス系型高温超伝導体単結晶から作製したメサ構造素子について、電流電圧特性および量子トンネル現象を系統的に評価して得られた物理的描像を提案するものであり、得られた成果は次のとおりである。

1. 電流電圧特性における最大ジョセフソン電流の分布について、3種の超伝導体の超伝導層の厚さ（原子面の枚数）で整理し、統一的な理解を見出した。
  - 第一スイッチはメサ構造素子の最上層の接合で起こり、常伝導金属電極との近接効果により最大ジョセフソン電流が抑制され、第二スイッチは準粒子から超伝導電子対への緩和過程が影響を与える。
2. Bi2212における第二スイッチに電荷結合の明示的な影響を見出した。
  - 第二スイッチで評価される量子揺らぎの強さは、最大ジョセフソン電流の大きさと反相関を示す。これは、相互作用を考慮しない単一ジョセフソン接合モデルと矛盾し、電荷結合モデルを用いることにより説明が可能となる。
3. 3つのビスマス系高温超伝導体における第二スイッチ現象を比較し、量子揺らぎの強さに関して、電荷結合による系統的な増大を示した。
  - 電荷結合は、CuO<sub>2</sub>原子層数が2から3になることによりほぼ消失する。
  - 内側 CuO<sub>2</sub>原子層に局在する超伝導電子が電荷結合を遮蔽している可能性を提示した。

本論文は、高温超伝導体の固有ジョセフソン接合系において長らく問題とされていた電荷結合に由来する現象を明示し、超伝導層内部の構造を考慮した固有ジョセフソン接合モデルの必要性を示唆している。また、固有ジョセフソン接合スタックは非線形振動子が近距離及び長距離に結合した系であり、理学から工学にわたる広範な学術分野において寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成29年6月16日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行い、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規定第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。